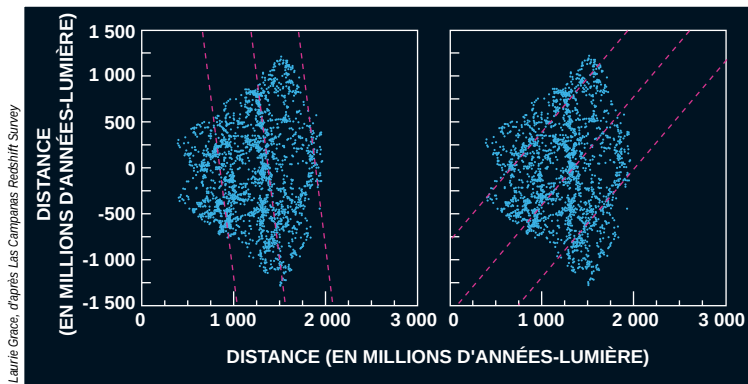
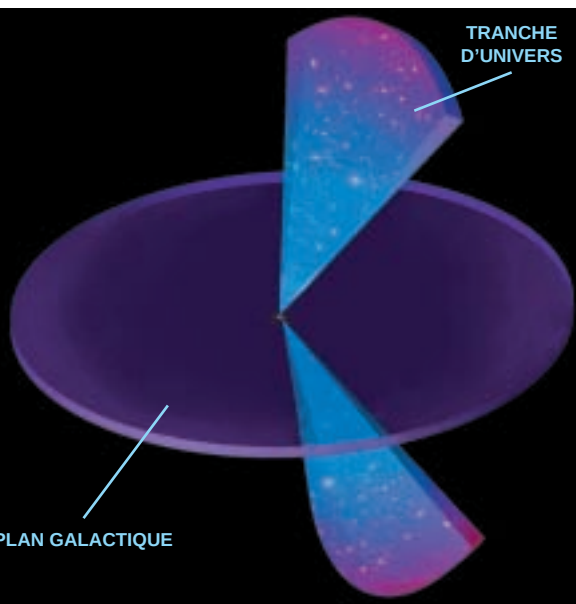




5. DEUX TRANCHES D'UNIVERS (à droite) ont été observées lors du sondage de Las Campanas. L'Univers est granuleux aux grandes échelles. Les points, qui représentent les milliers de galaxies contenues dans chaque tranche, ne sont pas répartis uniformément : ils se rassemblent en murailles (pointillées), créant des vides dans d'autres régions.



apparaître à des échelles bien supérieures. Le regroupement hiérarchique explique peut-être les petites structures, mais pas les murailles et les vides aux échelles supérieures.

Une nouvelle harmonie des sphères

Aucune des nouvelles hypothèses n'explique la totalité des observations. Certains astronomes ont invoqué un scénario de matière sombre chaude, où l'Univers est dominé par des particules légères, analogues aux neutrinos. L'Univers évoluerait alors de haut en bas, les grandes structures commençant à se former avant les petites. Malheureusement, cette théorie explique mal le regroupement des galaxies à petite échelle.

On a également supposé que l'Univers est moins dense qu'on ne le croyait et qu'il contient peu de matière sombre. Les particules ordinaires, tels les protons et les électrons, auraient constitué un fluide visqueux dans l'Univers primordial. Avant que l'Univers se refroidisse assez pour que protons et électrons se combinent en atomes, des ondes de densité (comme des ondes sonores) se seraient propagées. Après la combinaison des protons et des électrons, ces ondes auraient stimulé l'effondrement gravitationnel à certaines échelles. Curieusement, cette hypothèse résoudrait plusieurs énigmes cosmologiques (voir *L'inflation de l'Univers*, par Martin Bucher et David Spergel, in *Pour la Science*, mars 1999).

Dans une troisième hypothèse, on note que 600 millions d'années-lumière (l'échelle où l'écart entre les observations et la théorie de la matière sombre froide est le plus grand) est environ la distance de l'horizon au moment où la densité moyenne de matière dans l'Univers est devenue supérieure à la densité d'énergie sous la forme de rayonnement. Un changement aussi important a probablement perturbé le spectre de puissance. Quelle que soit l'explication finale, il se peut que nous détectons ici la plus grande échelle de longueur associée à un mécanisme physique dans la nature.

Même un recensement aussi important que celui de Las Campanas ne donne qu'un petit nombre de mesures indépendantes (50 environ) du spectre de puissance aux grandes échelles. D'autres sondages s'imposent, et plusieurs sont en cours. Un groupe australien, nommé 2DF, est en train de cartographier plus de 250 000 galaxies, et une collaboration américano-japonaise (*Sloan*) devrait ensuite mesurer les spectres de près d'un million de galaxies, sur la moitié du ciel, échantillonnant un volume 20 fois plus important que celui que nous avons analysé.

Au VI^e siècle avant notre ère, Pythagore a, le premier, appliqué l'analyse musicale au mouvement des astres : il supposait que les corps célestes étaient des trous dans des sphères de cristal et que le mouvement de ces sphères engendrait des sons. Les distances et les vitesses des corps célestes devaient être dans des rapports simples, comme

le sont les notes de la gamme occidentale. Pythagore supposait ainsi l'existence d'une «musique des sphères». Au XVII^e siècle, Johannes Kepler pensait que les orbites des planètes pouvaient être décrites comme des sphères célestes inscrites entre les cinq solides platoniciens (les polyèdres réguliers). Il croyait que les rapports harmonieux en musique pouvaient être déduits de ces solides et il légitimait une relation fondamentale entre les orbites des planètes et ces harmonies. Là encore, une musique des sphères était évoquée.

Aujourd'hui, notre notion de l'analyse harmonique est assez différente. Elle se fonde sur l'analyse des composantes harmoniques de répartitions aléatoires, et le son observé ressemble plus à celui d'une cascade qu'à un chant divin. Bien que l'analyse moderne ne soit pas aussi spirituelle que celle du passé, le concept d'un Univers isotrope associé à une compréhension des champs aléatoires nous permet d'entendre à nouveau la musique des sphères.

Stephen LANDY est astronome au Collège William & Mary, en Virginie.

P.J.E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

Stephen A. SHECTMAN et al., *The Las Campanas Redshift Survey*, in *Astrophysical Journal*, vol. 470, pp. 172-188, 10 octobre 1996.

Kelvin K.S. WU, Ofer LAHAV et Martin J. REES, *The Large-Scale Smoothness of the Universe*, vol. 397, pp. 225-230, 21 janvier 1999.

La détection des phéromones

DIDIER TROTIER • KJELL DØVING

Avec leur organe voméronasal, les mammifères analysent les substances biologiques émises par leurs congénères. L'activation de cet organe provoque souvent des réactions physiologiques qui favorisent la reproduction. Dans l'espèce humaine, l'organe voméronasal est peu développé, et il n'est sans doute pas fonctionnel.

En 1813, l'anatomiste danois Ludvig Jacobson (1783-1843) s'étonne de la présence d'une lamelle cartilagineuse allongée, dans le nez de nombreux mammifères. Il soulève ce cartilage et découvre un organe alors inconnu. Les neurophysiologistes explorent encore aujourd'hui le fonctionnement et les effets de cet organe qui, initialement nommé organe de Jacobson, fut renommé en 1895 organe voméronasal (*organon vomeronasale (Jacobsoni)*) par la Société allemande d'anatomie : l'organe est au contact du vomer, une lamelle osseuse verticale, située à la partie postérieure et inférieure de la cloison des cavités nasales.

Dans son article de 1813, que nous avons récemment retrouvé à l'Université d'agriculture de Copenhague, Jacobson montre l'importance de sa découverte : l'organe est présent de chaque côté de la cloison nasale chez tous les mammifères qu'il a observés (chat, vache, chien, chèvre, cheval, cochon, mouton, tigre, chameau, buffle, daim...) ; sa structure complexe et sa grande taille laissent imaginer un rôle physiologique important.

Chaque organe s'allonge vers l'arrière du nez et comporte un canal interne en cul-de-sac, fermé à l'arrière ; l'ouverture du canal est étroite (voir la figure 2). Chez les rongeurs, l'organe s'ouvre directement dans la partie avancée de la cavité nasale. Chez d'autres animaux, tels le chien, le porc, la chèvre

et le bœuf, l'ouverture communique avec le canal palatin, qui relie la bouche et le nez, derrière les incisives.

Jacobson observe que plusieurs vaisseaux sanguins, dont un très gros, irriguent l'organe. Le canal de l'organe étant rempli de mucus, le physiologiste

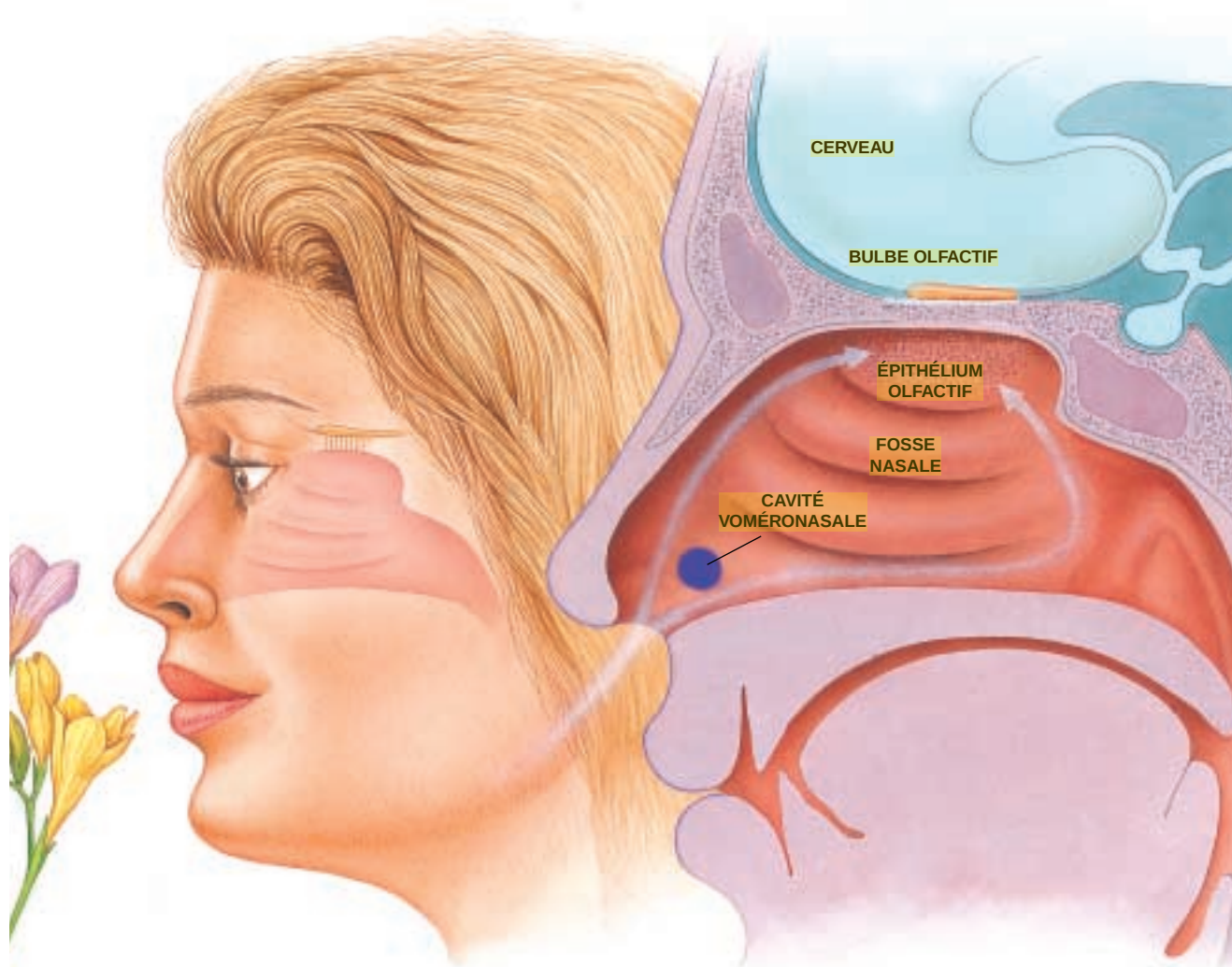
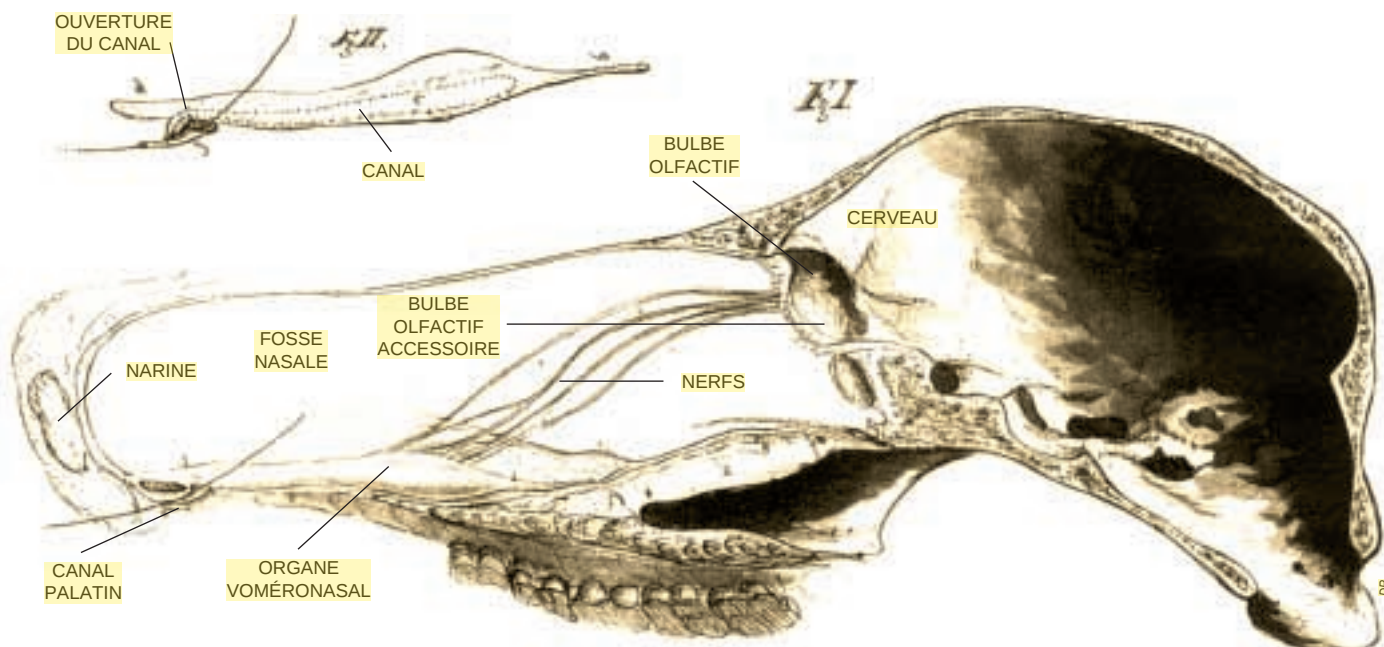
danois déduit que l'organe pourrait être sécréteur. Cependant, il voit aussi des faisceaux nerveux qui, issus de l'organe, remontent le long de la cloison nasale pour converger sur une petite zone du bulbe olfactif, dans la cavité cérébrale : il suppose que l'organe est plutôt sensoriel. Cette intuition s'est révélée parfaitement exacte.

Il a fallu attendre 140 ans pour comprendre la relation entre l'activation de l'organe voméronasal et certains aspects de la reproduction : en 1953, à Toulouse, le biologiste H. Planel observe que des cochons d'Inde mâles ont un comportement reproducteur amoindri quand on les prive de cet organe. Les femelles opérées ne présentent pas ce creusement des reins, nommé lordose d'accouplement, qui signale aux mâles l'acceptation de la copulation ; elles s'intéressent peu aux mâles.

Plus récemment, les études de la structure et de la fonction de l'organe voméronasal des animaux ont fait mieux connaître le monde des phéromones, ces molécules qui déclenchent des comportements chez les animaux. D'où la question : des phéromones humaines existent-elles ? L'intervention de l'organe voméronasal dans la détection des phéromones animales et sa présence chez l'homme ont fait croire que l'espèce humaine pourrait également être sensible à des molécules stimulant l'organe voméronasal et qui



1. LUDVIG JACOBSON découvrit l'organe voméronasal en 1813, à Leipzig. Il notifia sa découverte à Georges Cuvier, qui ne la mentionna pas. L'article original de Jacobson vient d'être retrouvé et traduit.



2. CES DESSINS À LA MAIN DE JACOBSON (*en haut*) montrent la position de l'organe voméronasal dans la cavité nasale du cerf. L'ouverture de l'organe est proche du canal palatin (entre le nez et la bouche), où Jacobson a inséré un fil. Les faisceaux nerveux qui sortent de l'organe voméronasal longent la cloison nasale et se connectent à des cellules du bulbe olfactif accessoire ; de là, l'in-

formation monte vers le cerveau. Dans l'organe isolé montré en haut à gauche, Jacobson indique le canal interne de l'organe qui est fermé vers l'arrière (*pointillés*). L'organe voméronasal (*en bas*) est très réduit, voire absent, dans l'espèce humaine. Les neurophysiologistes n'y ont trouvé aucun neurone sensoriel, ni aucune connexion avec une partie olfactive du cerveau.

seraient ces phéromones humaines dont rêvent les fabricants de parfum.

Toutefois, nous le verrons, les études récentes d'anatomie et d'histologie montrent que l'organe voméronasal humain n'est vraisemblablement plus équipé pour la détection de molécules stimulantes. Considérablement réduit, il semble même absent chez certains individus.

D'autre part, si des molécules prélevées dans la sueur ou dans les sécrétions humaines provoquent quelques réactions physiologiques, elles agissent dans des conditions qui n'ont rien à voir avec les conditions d'action des phéromones animales. Aucune découverte d'une phéromone humaine n'ayant été confirmée, l'annonce d'un effet comportemental provoqué par un des composés qui agiraient sur l'organe voméronasal doit être examinée avec beaucoup de circonspection.

Le nez des composés non volatils

Les mammifères communiquent en échangeant de l'information chimique, utilisant des sécrétions (buccales, anales, génitales, cutanées, etc.) qu'ils mêlent à l'urine, à la salive, aux décharges vaginales, aux fèces, etc. La composition des sécrétions dépend de nombreux facteurs, tels que l'espèce, le sexe, la position sociale, la maturité sexuelle, l'état hormonal, l'aptitude à la reproduction...

Ces sécrétions contiennent des molécules volatiles, qui, portées par l'air, parviennent au système olfactif des congénères. Cette communication aérienne à distance joue un rôle clé dans des comportements variés : c'est par l'olfaction que les animaux délimitent leur territoire, repoussent les rivaux potentiels, attirent les partenaires ou envoient des messages d'alerte.

Toutefois l'information volatile n'est qu'une partie de l'information présente dans les sécrétions des congénères. Ces dernières contiennent également de nombreuses molécules trop

peu volatiles pour atteindre l'organe olfactif : stéroïdes (des molécules dérivées du cholestérol et sécrétées par les glandes endocrines), peptides et protéines (des enchaînements d'acides aminés), etc. Ces molécules, qui donnent des indications sur l'état physiologique de l'individu qui les émet, peuvent être captées par l'organe voméronasal d'un congénère. Aujourd'hui, on considère que l'apparition de l'organe voméronasal avec les amphibiens, et sa présence chez tous les serpents et chez les mammifères terrestres, résultent de l'adaptation des organismes à la vie terrestre : les poissons, qui utilisent l'eau comme vecteur de communication chimique, ne possèdent pas d'organe voméronasal, même si leurs cavités nasales assurent une fonction équivalente.

Grâce à sa position très avancée dans la cavité nasale des mammifères, l'organe voméronasal détecte les molécules de communication par un contact direct avec les liquides biologiques qu'il analyse. Quand on approche un hamster mâle d'une femelle apte à la repro-

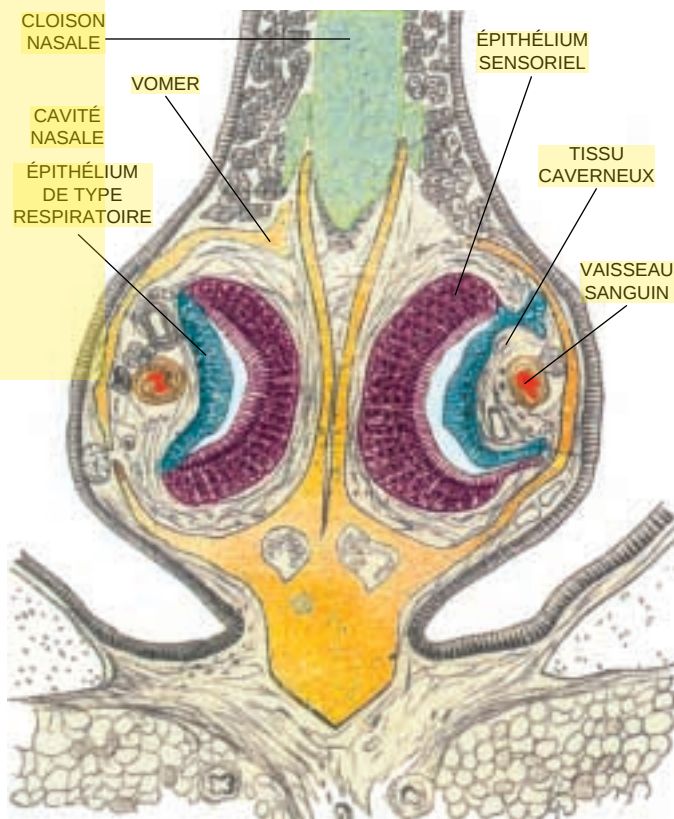
duction, par exemple, celle-ci émet dans ses sécrétions vaginales des composés soufrés volatils, tel le diméthylsulfure, qui éveillent l'intérêt olfactif du mâle. Celui-ci explore alors la zone génitale de la femelle avec son museau, d'autant plus énergiquement qu'il est jeune et sexuellement inexpérimenté.

Au cours de ces contacts, les sécrétions vaginales atteignent les narines du mâle et, diluées par des sécrétions de glandes localisées dans le vestibule nasal, elles sont transportées jusqu'à l'ouverture des organes voméronasaux. Ceux-ci obtiennent alors une information chimique, et les messages qu'ils envoient au cerveau favorisent le comportement de copulation.

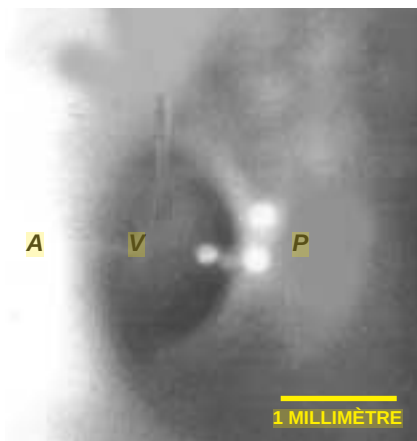
À la fin des années 1980, à l'Institut Monell de Philadelphie, Alan Singer a montré qu'une petite glycoprotéine (une molécule composée d'une partie protéique, enchaînement de 151 acides aminés, et d'un sucre), joliment nommée aphrodisine, est présente dans les sécrétions vaginales des femelles en œstrus et détectée par les organes voméronasaux des mâles.

Cette protéine est synthétisée par le vagin, par la partie basse de l'utérus et par les glandes de Bartholin (les glandes dont les sécrétions lubrifient le vagin). Elle appartient à la famille des lipocalines, c'est-à-dire des protéines qui fixent et transportent de petites molécules. Quelles molécules l'aphrodisine transporte-t-elle ? On l'ignore encore, et l'on a supposé que ces molécules inconnues activeraient les organes voméronasaux, mais A. Singer a observé que la protéine purifiée, probablement sans ligand fixé, active les neurones voméronasaux et provoque l'effet comportemental précédemment décrit.

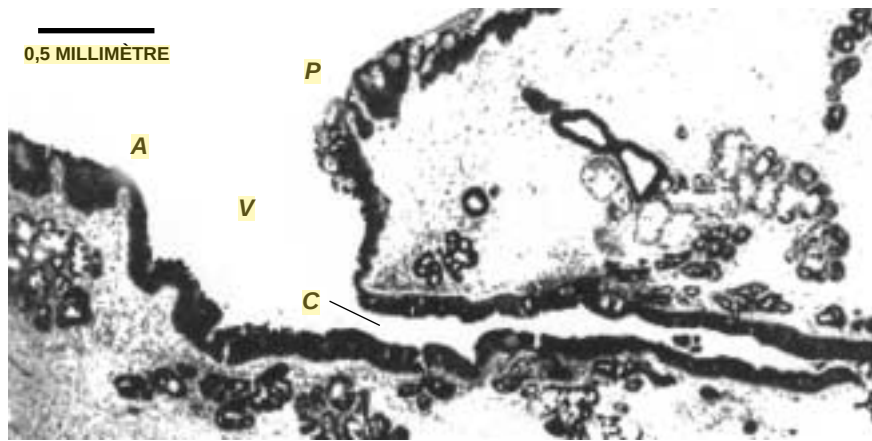
Les organes voméronasaux permettent ainsi aux animaux d'accéder à l'ensemble des molécules volatiles et non volatiles qui sont présentes dans les sécrétions biologiquement significatives. Chez les rongeurs, ces organes s'ouvrent dans la cavité nasale, en avant du canal palatin antérieur, si bien que les



3. ORGANES VOMÉRONASaux DE SOURIS. Sur cette coupe transversale, on voit que les organes, situés à la base de la cloison nasale, sont supportés et entourés par le vomer (l'os du nez qui forme la structure de la cloison nasale). L'épithélium sensoriel occupe la face médiane du canal. L'autre face contient un tissu qui, en gonflant ou en dégonflant, pompe ou refoule le mucus nasal et fait venir des molécules stimulantes au contact des neurones sensoriels.



4. OUVERTURE D'UNE CAVITÉ VOMÉRONASALE observée par endoscopie à la surface de la cloison nasale d'un homme adulte (à gauche). Cette ouverture forme une dépression en entonnoir d'environ un millimètre de diamètre. Le bord postérieur (P) et le



bord antérieur (A) du vestibule (V) sont indiqués. La coupe de droite montre que le vestibule se prolonge vers l'arrière par un canal (C) étroit couvert par un épithélium. On n'a pas trouvé de neurones, dans cet épithélium.

molécules stimulantes empruntent la voie nasale pour y arriver. Chez les animaux dont les organes voméronasaux s'ouvrent dans le canal palatin, les molécules stimulantes passent par le nez et aussi par la bouche. Beaucoup de mammifères, tels les chiens léchant l'urine des femelles en chaleur, s'aident de la langue pour se stimuler.

Certains mammifères, notamment les félinés et les ongulés, ont ainsi un comportement typique, lors des rapports socio-sexuels et lors de l'analyse des liquides biologiques émis par les congénères : ils relèvent la tête, plissent le nez, retroussent la lèvre supérieure et cessent momentanément de respirer. Cette grimace, nommée *Flehmen*, facilite l'accès des molécules stimulantes aux organes voméronasaux. Chez le cheval, le *Flehmen* est souvent associé à un hennissement. Chez les ongulés, il accompagne le contact avec l'urine ou avec les sécrétions vaginales. Lors de rencontres hétérosexuelles, seul le chat mâle montre ce comportement après contact du museau avec les sécrétions à analyser. En revanche, les chattes présentent parfois ce comportement lorsqu'elles analysent un objet marqué par un mâle en l'absence de ce dernier. Le comportement de *Flehmen* dépend des espèces, du sexe et du contexte.

Chez les serpents et chez divers reptiles (tels les dragons de Komodo, voir *Pour la Science*, mai 1999), les organes voméronasaux, beaucoup plus développés que les organes olfactifs, semblent utilisés pour la chasse. La langue assure le transport des molécules stimulantes vers l'ouverture des organes, dans la bouche.

L'éléphant est l'animal dont l'organe voméronasal est le plus gros : 25 centimètres de long et 4 centimètres de diamètre. Cet organe joue un rôle prépondérant dans la communication chimique rapprochée de ces animaux : l'éléphant d'Asie mâle trempe sa trompe dans l'urine de femelles en phase pré-ovulatoire, puis il transporte ce liquide vers les ouvertures buccales de ses organes voméronasaux. Son comportement de *Flehmen* répété plusieurs fois précède l'éveil sexuel, l'érection et la copulation.

Un organe actif

Comment l'organe voméronasal fonctionne-t-il ? Les explications anatomiques ont d'abord été complétées par des explorations physiologiques et, plus récemment, par des études de biologie cellulaire. En contact avec la partie postérieure et inférieure de la cloison des cavités nasales, les organes voméronasaux reposent sur ses deux prolongements antérieurs. Une lamelle osseuse ou cartilagineuse enveloppe le côté latéral de l'organe, l'isolant de la cavité nasale et le maintenant dans une capsule rigide.

En coupe transversale (voir la figure 3), le canal de l'organe voméronasal est en forme de croissant. Les neurones sensoriels sont exclusivement dans l'épithélium qui forme la face interne, concave du canal. La face latérale convexe n'est pas sensorielle ; elle est couverte de cellules ciliées, analogues à celles du système respiratoire, qui brassent le mucus.

Le canal est un cul-de-sac fermé vers l'arrière et son ouverture antérieure

est étroite : comment les molécules stimulantes et les molécules stimulantes qu'il contient sont-ils entraînés à l'intérieur du canal ? En 1949, le physiologiste M. Hamlin a découvert un système de pompage, assuré par une variation de la turgescence du tissu caverneux qui se trouve sous l'épithélium non sensoriel du canal. Ce tissu caverneux est traversé par une grosse veine. Comme l'organe est maintenu rigidement sur sa périphérie, la contraction du tissu caverneux dilate le canal interne et aspire les molécules stimulantes pendant plusieurs secondes. Puis, la vasodilatation du tissu comprime le canal et expulse le liquide analysé.

La détection par l'organe voméronasal est donc un mécanisme actif. Selon Michael Meredith, de l'Université de Floride, la pompe s'active, chez des hamsters en captivité, lors de toute situation nouvelle : présence d'un congénère, ouverture de la cage, etc.

Les neurones sensoriels de l'organe voméronasal assurent la double fonction de détection des molécules stimulantes et de transmission de l'information nerveuse au cerveau. Leurs axones (l'axone est le prolongement des neurones, qui établit un contact avec d'autres neurones qui reçoivent l'information), très longs, se regroupent en plusieurs rameaux nerveux, qui courent le long de la cloison nasale. Ils passent la lame criblée, qui sépare la cavité nasale du cerveau, et établissent des contacts synaptiques avec les neurones d'une zone du bulbe olfactif, nommée bulbe olfactif accessoire en raison de sa taille (pas de sa fonction!).

Comme les neurones olfactifs, les neurones voméronasaux proviennent